

УДК 621.3.011.72

ПОБУДОВА ДИСКРЕТНИХ МАКРОМОДЕЛЕЙ ОБ'ЄКТІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ НА ПІДСТАВІ РЕАЛЬНИХ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Б.С.Стогній¹, академік НАН України, **М.Ф.Сопель¹**, канд.техн.наук, **П.Г.Стахів²**, докт.техн.наук, **Ю.Я.Козак²**, канд.техн.наук, **О.П.Гоголюк²**, канд.техн.наук

¹ – Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна,

² – Національний університет “Львівська політехніка”,
вул. С.Бандери, 12, Львів, 79013, Україна,
e-mail:spg@polynet.lviv.ua

У статті розглянуто проблему прогнозування перебігу перехідних процесів ЕЕС та їхніх об'єктів на підставі реальних часових характеристик, отриманих під час їхньої реєстрації за допомогою сучасних систем моніторингу параметрів режимів та стану обладнання енергооб'єктів. Запропоновано використовувати макромоделі складових ЕЕС у вигляді "чорної скриньки" у формі змінних стану, створені на підставі даних, отриманих під час натурних експериментів чи реєстрованих нормальних й аварійних режимів для швидкого прогнозування перебігу перехідних процесів. Описано побудову макромоделі підстанції "Альбертіша" за принципом "чорної скриньки" на підставі даних про аварії, записаних комплексом "Регіна", та наведено одержані результати. Бібл.7, табл.2, рис. 4.
Ключові слова: електроенергетична система, макромодель, програмне середовище, підстанція.

Розвиток електроенергетичного комплексу України повинен відповідати не тільки новим цілям і тенденціям розвитку світової енергетики та сучасному рівню апаратно-технічної бази і методів наукових досліджень, але й враховувати реальний стан встановленого обладнання електроенергетичних систем (ЕЕС). Створення методів, методик і програмного забезпечення для прогнозування перебігу динамічних електромагнітних процесів ЕЕС на підставі реальних часових характеристик у цілому та їхніх об'єктів зокрема, отриманих під час перехідних процесів, усталених та аварійних режимів, є актуальною науковою задачею, яка потребує нагального вирішення.

Головними вимогами до становлення надійної світової енергетики є нерозривність та узгодженість дій при забезпеченні трьох складових: енергозабезпечення (безперебійне постачання електричною енергією відповідної якості), енергодоступність (енергоощадність та доступна ціна на електроенергію) та енергоприйнятність (мінімальний вплив на навколишнє середовище) [6]. Завчасне виявлення і ідентифікація аварійних ситуацій, що виникають в ЕЕС, з метою попередження диспетчерських служб або ж автоматичного виконання процедур, які б мінімізували вплив таких ситуацій на загальний стан системи, а також довготривале прогнозування техніко-економічних характеристик ЕЕС на основі інформації про значення їх у минулому покращить та полегшить їхню експлуатацію [5].

Одним із факторів нормального функціонування ЕЕС є оперативне виявлення, а по можливості і усунення виникнення неполадок, які можуть зумовити аварійні ситуації, за час від декількох секунд до годин. Їхнє математичне моделювання за умови врахування усіх компонент не може виконуватися в реальному часі, що є необхідною умовою оперативного керування ЕЕС, якщо будуть використані класичні математичні моделі елементів з урахуванням їхньої топології та фізичних властивостей. Одним із шляхів вирішення даної ситуації є макромодельовання, яке у разі його застосування для побудови математичних моделей досліджуваних систем дозволяє відобразити основні найбільш важливі характеристики модельованих об'єктів на основі їхніх експлуатаційних характеристик. Удосконалення математичного апарату дискретного макромодельовання, його модифікація до потреб прогнозування динамічних характеристик ЕЕС, як швидкоплинних, так і довготривалих, а також адаптація до сучасних технічних засобів збору інформації дозволить вирішити задачі, описані вище.

Світові системи збору інформації, оперативного контролю та моделювання ЕЕС. У світовій практиці для збору інформації застосовується така система оперативного контролю як SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), а для дослідження перехідних процесів у реальному часі використовуються цифрові мережеві аналізатори перехідних процесів (DTNA – Digital Transient Network Analysers) [7]. У нормальному робочому режимі такі пристрої повинні виконувати неперервні дії, необхідні для обчислення перехідних характеристик тестованого обладнання за часовий крок, менший ніж дійсний час, притаманний для даного процесу. За такої умови можна виконувати реальне тестування обладнання, яке змінює симуляційну модель, і отримувати зворотній вплив на поведінку устаткування. Використання паралельної обробки інформації є ключовим моментом для досягнення відповідної обчислювальної потужності, необхідної для розв'язування систем рівнянь в реальному часі.

На сьогодні за кордоном для моделювання ЕЕС в реальному часі застосовується Real Time Digital Simulator чи RTDS, який володіє сучасними технологіями для надійного, швидкого і ефективного моделювання електроенергетичних об'єктів та мереж. Цей комплекс є повністю цифровим симулятором електромагнітних перехідних процесів, який може виконувати цифрове моделювання електроенергетичних систем на основі алгоритмів, закладених у середовища типу EMTP (ATP, PSCAD), які не використовуються для аналізу процесів в реальному часі. RTDS володіє перевагами устаткування, яке використовується для паралельної обробки інформації і містить спеціальні модулі-процесори. Він має програму з графічним інтерфейсом, яка передбачає використання окремих модулів для обробки інформації і включає численні моделі елементів ЕЕС та систем керування для відтворення окремих тестових випадків та експлуатаційних режимів. RTDS використовує спеціалізовані обчислювальні машини для виконання паралельної обробки інформації - цифрові сигнальні процесори DSP. Технічна система RTDS дозволяє проводити тестування у замкненому циклі, під час якого застосовується апаратна частина, що, в свою чергу, взаємодіє з комп'ютерною моделлю, як це показано на рис. 1.

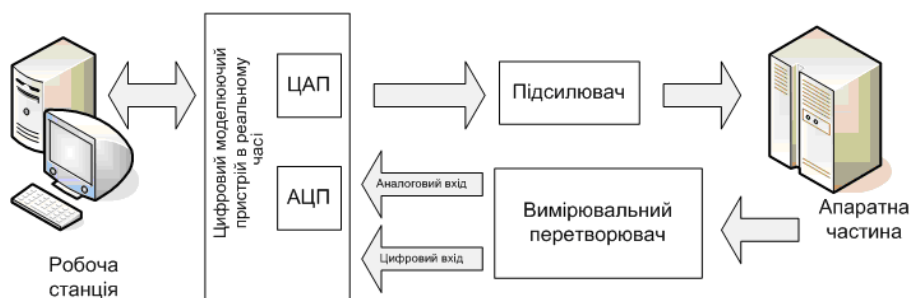


Рис. 1

Моделювання за допомогою RTDS передбачає використання двох програмних засобів, а саме бібліотеки моделей та компіляторів PSCAD, а також спеціального графічного інтерфейсу користувача. Моделі програми PSCAD дозволяють користувачу створити графічне зображення досліджуваної ЕЕС традиційно у вигляді

сполучених піктограм (елементи, шини, системи керування) відповідно до функційної схеми. На даний час програма PSCAD орієнтована на використання в комплексі RTDS і є окремим програмним продуктом. Коли модель досліджуваної системи вже створена та введені відповідні параметри, компілятор генерує коди нижчого рівня для виконання моделювання програмними засобами RTDS, визначаються функції кожної процесорної карти для кожного симулювання та кожного процесора DSP відповідно до сконструйованої схеми та наявної апаратної частини RTDS. Найбільш часто RTDS моделюючі пристрої використовують для моделювання захисних реле та тестування систем керування.

Альтернативою є цифрові мережеві аналізатори перехідних процесів DTNA, які можуть виконувати тестування у реальному часі на стандартному багатопроцесорному комп'ютері. Їхня робота у реальному часі вимагає створення інтерфейсу між апаратною частиною фізичного обладнання та програмним забезпеченням. Взаємодія між фізичним обладнанням під час тестування та модельованою ЕЕС виконується на кожному часовому кроці. Для зменшення часу моделювання застосовують спеціальні програми, орієнтовані на багатопроцесорні машини. Загальна структура цифрового мережевого аналізатора перехідних процесів DTNA зображена на рис. 2.

Аналізатор такого типу будується на основі стандартного паралельного комп'ютера HP-CONVEX, внутрішня архітектура якого дозволяє повний обмін інформацією між різними процесорами. Це збільшує потужність обчислень прямопропорційно до кількості процесорів, на відміну від інших комп'ютерів, які можуть досягнути фізичних обмежень через перекриття шин. Як програмне забез-

печення використовується ЕМТР-орієнтована програма ARENE (Real-Time Digital Electromagnetic Transient Power Simulator), створена корпорацією Electricite de France (EDF), яка є потужним і зручним засобом для аналізу електричних систем і точного тестування устаткування в темпі процесу [7].

Таким чином, прогрес, який характерний для цифрової паралельної обробки інформації, може бути реальним підґрунтям для розрахунку та моделювання ЕЕС у реальному часі, що дозволить виконувати тестування систем керування та захисту. Наявні RTDS моделюючі пристрої потенційно можуть дозволити моделювання ЕЕС довільної структури та складності, проте створення програмного забезпечення на основі паралельних комп'ютерів для моделювання в реальному часі на основі паралельних алгоритмів та удосконалених моделей і макромоделей елементів ЕЕС замість розглянутих засобів в перспективі може бути ефективним та економічно вигідним способом вирішення поставлених задач.

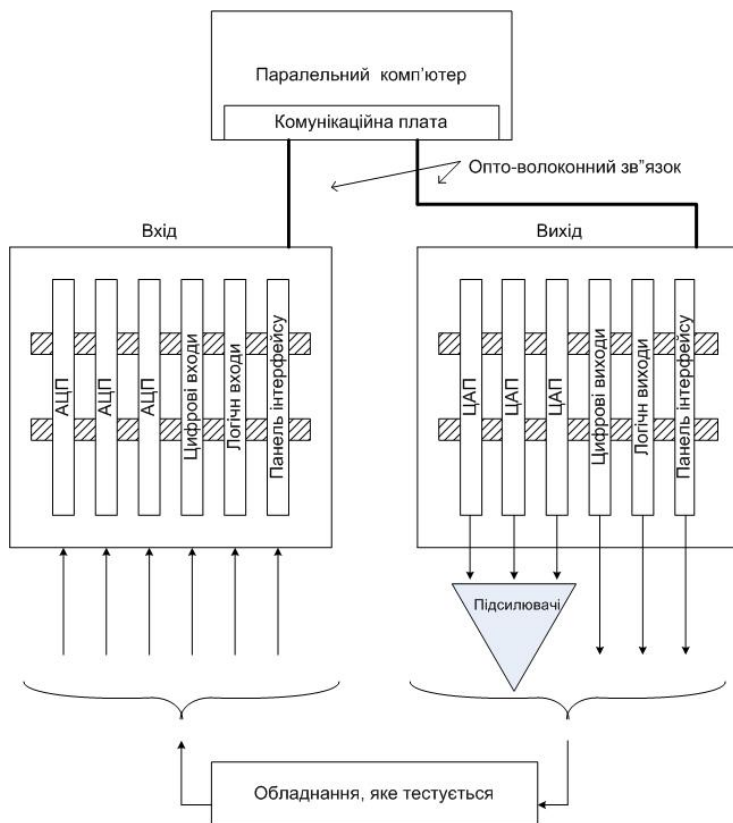


Рис. 2

Вдяки саме цим перспективним властивостям з'явилися можливості для розв'язання низки наукових та технічних завдань, які практично не вирішувалися, на підставі інформації про режими та процеси від реєстраторів комплексів "РЕГІНА". Серед найбільш важливих наукових задач, які вже можна вирішити, слід відзначити ретроспективний аналіз подій та режимів, уточнення та налаштування моделей, що стосуються динамічних характеристик енергооб'єктів, покращення якості результатів оцінювання стану енергооб'єктів тощо.

Базовим елементом комплексів "РЕГІНА" є реєстратор сигналів, який фіксує електричні сигнали змінного та постійного струму і напруги, а також дискретні потенційні сигнали або сигнали типу "сухий контакт". Цей комплекс може бути реалізовано як у вигляді двохрівневої архітектури (структура містить вимірювальні перетворювачі аналогових сигналів, модулі вводу-виводу дискретних сигналів, обчислювальний модуль, ПЕОМ (сервер), модем та блок автозапуску), так і локальної мережі. До сімейства комплексів "РЕГІНА" належить і створений електровимірювальний реєструючий прилад "РЕГІНА-Ч", який за своїми технічними характеристиками та функціональними можливостями не має аналогів в Україні і не лише знаходиться на рівні кращих світових зразків подібних приладів, що виготовляються провідними іноземними фірмами-виробниками (*RES-521 β version* – розробка фірми ABB, *NCT2000 Type A* – розробка фірми Toshiba, *PowerLog PL134* – розробка фірми AENEA GmbH), а за деякими показниками має суттєві переваги. Визначальною особливістю комп-

Як за кордоном, так і в Україні, метою впровадження сучасних систем моніторингу параметрів режимів та стану обладнання енергооб'єктів є виявлення загрози виникнення аварійних ситуацій та збереження працездатності обладнання, і як наслідок, функціонування цілої енергосистеми кожної країни. В Україні для моніторингу ЕЕС створено та успішно використовуються апаратно-програмні комплекси різного функціонального призначення під загальною назвою "РЕГІНА". Вони призначені для реєстрації аналогових та дискретних сигналів; визначення місця пошкодження при коротких замиканнях на ЛЕП; аналізу розвитку аварійних ситуацій; діагностування обладнання; проведення фазового та гармонічного аналізу сигналів; виділення симетричних складових в трифазних мережах змінної напруги; формування добової відомості режимів тощо [6]. На сучасному етапі комплекси "РЕГІНА" мають найкращі технічні характеристики та показники функціонування в Україні, забезпечуючи високоточні синхронізовані за супутниковими сигналами єдиного часу вимірювання режимних параметрів. За-

лексу "РЕГНА-Ч, надзвичайно важливою з погляду його подальшого використання як основного засобу збору даних для побудови макромоделей ЕЕС України, їхніх окремих елементів чи складових, є застосування інформаційної технології синхронізованих вимірювань векторів напруги з використанням сигналів GPS, що відкриває принципово нові можливості для визначення динамічних властивостей ОЕС України та побудови макромоделей елементів, що експлуатуються саме в Україні з перспективою їх подальшої адаптації до відповідних програмних комплексів комп'ютерного моделювання режимів і процесів ЕЕС. Використання макромоделей елементів та складових ЕЕС у формі "вхід-вихід", створених на підставі реальних даних, отриманих під час натурних експериментів чи реєстрованих нормальних й аварійних режимів, надасть нові можливості для швидкого прогнозування перебігу перехідних процесів і уможливить моделювання ЕЕС у реальному часі [3].

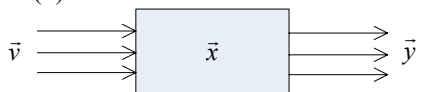
Результати обробки даних комплексу "РЕГНА" виводяться у вигляді, найбільш інформативному та зручному для обслуговуючого персоналу (текстові повідомлення, графіки, таблиці, осцилограми тощо). За умови наявності текстових даних, які містять інформацію про часові відліки з певним кроком дискретизації та значеннями (миттєвими чи діючими) напруг та струмів на вході та виході об'єкта, який підлягає моделюванню, набори масивів даних з описом усталених, перехідних та аварійних режимів можуть бути використані для побудови дискретних математичних макромоделей у формі рівнянь стану з використанням концепції "чорної скриньки". Для цього дослідник повинен володіти даними об'єкту у формі "вхід-вихід" з фіксацією часового відліку, які надаються одним реєструючим пристроєм. Якщо здійснюється моделювання об'єкту з фіксацією даних декількома реєстраторами (у випадку віддаленості точок реєстрації напруг та струмів), то їхній запис повинен синхронізуватися за допомогою сигналів точного часу від системи глобального позиціонування GPS.

Побудова дискретних макромоделей ЕЕС та їхніх складових на основі результатів оперативного контролю. У НЕК "Укренерго", обленерго, атомних, гідро- та електростанціях встановлено системи моніторингу перехідних процесів РЕГНА-Ч, які дозволяють отримати апріорну інформацію, придатну для використання з метою побудови дискретних макромоделей тестованого обладнання.

Математичні макромоделі як окремих елементів електроенергетичної системи, так і її складових (наприклад, окремих підстанцій) можуть бути створені на основі апріорної інформації, наданої замовником за допомогою спеціального програмного комплексу Macromodel, призначеного для побудови динамічних макромоделей об'єктів у вигляді "чорної скриньки" у формі нелінійних дискретних рівнянь стану. Дискретна макромодель будь-якого об'єкту будується на основі дискретних значень сигналу (або сигналів) на вході і виході об'єкту, які потрібно записати у текстовий файл. За допомогою методів оптимізації виконується підбір параметрів моделі. Далі графічні засоби програми дозволяють відтворити реакцію щойно побудованої макромоделі на вхідний сигнал та порівняти її з вхідними масивами даних. Отримані залежності та одержану модель можна зберегти у вигляді масивів текстових даних, придатних для обробки у інших графічних редакторах чи математичних пакетах. Якісна оцінка створеної макромоделі проводиться на основі таких критеріїв, як точність, область та межі застосування, а також оцінки машинних та часових ресурсів, необхідних для її побудови та апробації. Точність макромоделі може бути оцінена як відхилення результатів моделювання, отриманих на основі розробленої макромоделі, від тих, які використовувалися для її побудови.

Макромоделі, створені з використанням даних, отриманих в результаті натурального експерименту, дозволяють здійснювати розрахунок перехідних характеристик складних електроенергетичних систем та їхніх складових без виконання їхнього повного і детального аналізу, особливо великовимірних систем. Також за допомогою макромодельовання можна здійснювати прогнозування параметрів ЕЕС, зокрема тривалого споживання електроенергії. Запропонований підхід до створення макромоделей дозволив авторам розробити макромоделі елементів електротехнічних та електроенергетичних систем, а саме електромеханічних перетворювачів та електроенергетичних елементів (вентильного та асинхронного двигунів, трифазного трансформатора, турбогенератора тощо). За його допомогою побудовано прогнозні характеристики споживання електричної енергії як в Україні, так і в Росії. Макромоделі дають змогу виконувати розрахунок перехідних процесів ЕЕС та їхніх елементів як за умови їхнього самостійного використання, так і у складі бібліотек програмного забезпечення.

Послідовність побудови макромоделей на основі тестових даних, отриманих на підставі систем моніторингу та оперативного контролю

Етап 1	Отримання масивів даних під час моніторингу режимів ЕЕС у текстовій формі у вигляді масивів вхідних та вихідних даних	Перевірка формату, розмірності даних, дискретності, достатності вхідних даних (наявність достатньої кількості тестових режимів для побудови макромоделі та її верифікації)
Етап 2	<p>Формування масивів даних для побудови дискретних математичних макромоделей у вигляді "чорної скриньки", наведеної нижче у формі змінних стану за допомогою рівняння (1):</p>  <p>де \vec{v} є масивами вхідних змінних; \vec{y} масивами вихідних змінних; \vec{x} є неерестрованими внутрішніми змінними об'єкту</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) Вибір форми макромоделі у вигляді "чорної скриньки" (лінійна, нелінійна); 2) вибір структури векторів вхідних та вихідних величин з урахуванням можливості подальшої їхньої композиції з іншими моделями та макромоделями; 3) визначення часу дискретизації, достатнього для якісного відтворення процесу (прорідження даних за потребою); 4) формування файлів у форматі вхідних даних для програмних засобів побудови макромоделей та їхнього подальшого відтворення (час, вхідна величина, вихідна величина)
Етап 3	Побудова дискретних макромоделей у формі змінних стану у вигляді "чорної скриньки"	Вибір оптимальної структури макромоделі, зменшення її розмірності, пришвидшення процесу побудови макромоделі та покращення її точності за рахунок вдалого вибору методів оптимізації для її побудови
Етап 4	Верифікація макромоделі на незалежному наборі перехідних характеристик	Додаткова оптимізація макромоделі у випадку її недостатньої адекватності під час верифікації на незалежному наборі сигналів
Етап 5	Адаптація отриманої макромоделі до програм моделювання перехідних процесів (апаратно-програмного комплексу моніторингу режимів і процесів ЕЕС)	Використання сучасного програмного забезпечення, у бібліотеки якого може бути вбудована створена макромоделі (-і). Створення бібліотеки макромоделей об'єктів, експлуатованих в Україні.

Приклад побудови макромоделі конкретного об'єкта ЕЕС України на основі тестових даних, отриманих на підставі систем моніторингу та оперативного контролю.

Одним з найпростіших прикладів підстанцій з точки зору побудови її макромоделі за принципом "чорної скриньки" є підстанція "Альбертірша". Даний об'єкт характеризується невеликою кількістю вхідних і вихідних ліній. А саме: одна вхідна 3-фазна лінія і одна вихідна 3-фазна лінія. Таким чином підстанцію "Альбертірша" можна розглядати як 6-полюсник.

На даній підстанції за останніх декілька років за допомогою системи "Регіна" було зафіксовано три однофазних коротких замикань на лінії "Бурштин-Альбертірша", а саме: 22.07.2010 о 04:17; 18.05.2011 о 10:13; 05.12.2012 об 11:15 (2 спрацювання реєструючої апаратури з інтервалом у 8 секунд)

У вказаних випадках системою "Регіна" було записано перехідні процеси на усіх 6-х контактах даного об'єкта моделювання. Дані про перехідні процеси записувалися протягом 6 секунд, включаючи 200 мс до виникнення аварії. Крок дискретизації – 1 мс. Фрагмент даних з аварії 22.07.2010 показано на рис. 3. Цифрами на рисунку позначено наступні величини: 1- u_{a1} , 2- u_{b1} , 3- u_{c1} – напруги вхідної лінії 330 кВ; 4- i_{a1} , 5- i_{b1} , 6- i_{c1} – відповідні струми; 7- u_{a2} , 8- u_{b2} , 9- u_{c2} – напруги вихідної лінії 750 кВ; 10- i_{a2} , 11- i_{b2} , 12- i_{c2} – відповідні струми. Тут і надалі усі напруги подаються в мегавольтах, струми – в кілоамперах. Такий масштаб є зручним, оскільки в такому випадку величини, подані на графіку, будуть одного порядку.

За вхідні величини при побудові макромоделі було обрано миттєві значення вхідних фазних напруг u_{a1} , u_{b1} , u_{c1} та миттєві значення вихідних лінійних струмів i_{a2} , i_{b2} , i_{c2} ; за вихідні величини – миттєві значення вхідних лінійних струмів i_{a1} , i_{b1} , i_{c1} та миттєві значення вихідних фазних напруг u_{a2} , u_{b2} , u_{c2} . Макромоделі будувався у формі дискретних рівнянь змінних стану

$$\begin{cases} \vec{x}^{(k+1)} = F\vec{x}^{(k)} + G\vec{v}^{(k)} + \Phi(\vec{x}^{(k)}, \vec{v}^{(k)}) \\ \vec{y}^{(k+1)} = C\vec{x}^{(k+1)} + D\vec{v}^{(k+1)} \end{cases}, \quad (1)$$

де \vec{v} – вектор вхідних змінних; \vec{y} – вектор вихідних змінних; \vec{x} – вектор, що описує внутрішній стан об'єкту; F, G, C, D – матриці коефіцієнтів макромоделі; Φ – деяка нелінійна вектор-функція багатьох змінних; k – порядковий номер дискрети.

Розмірність вектора змінних стану було обмежено 3-ма компонентами.

Для ідентифікації коефіцієнтів макромоделі використовувався оптимізаційний підхід. Визначення коефіцієнтів моделі в цьому підході базується на мінімізації деякої функції мети $Q(\vec{\lambda})$, яка відображає відхилення поведінки модельованого об'єкта, розраховане за допомогою побудованої моделі, від експериментальних даних. Очевидно, що ця функція буде залежати від коефіцієнтів макромоделі. Множина перехідних процесів, на основі яких розраховується функція мети, вважається незмінною.

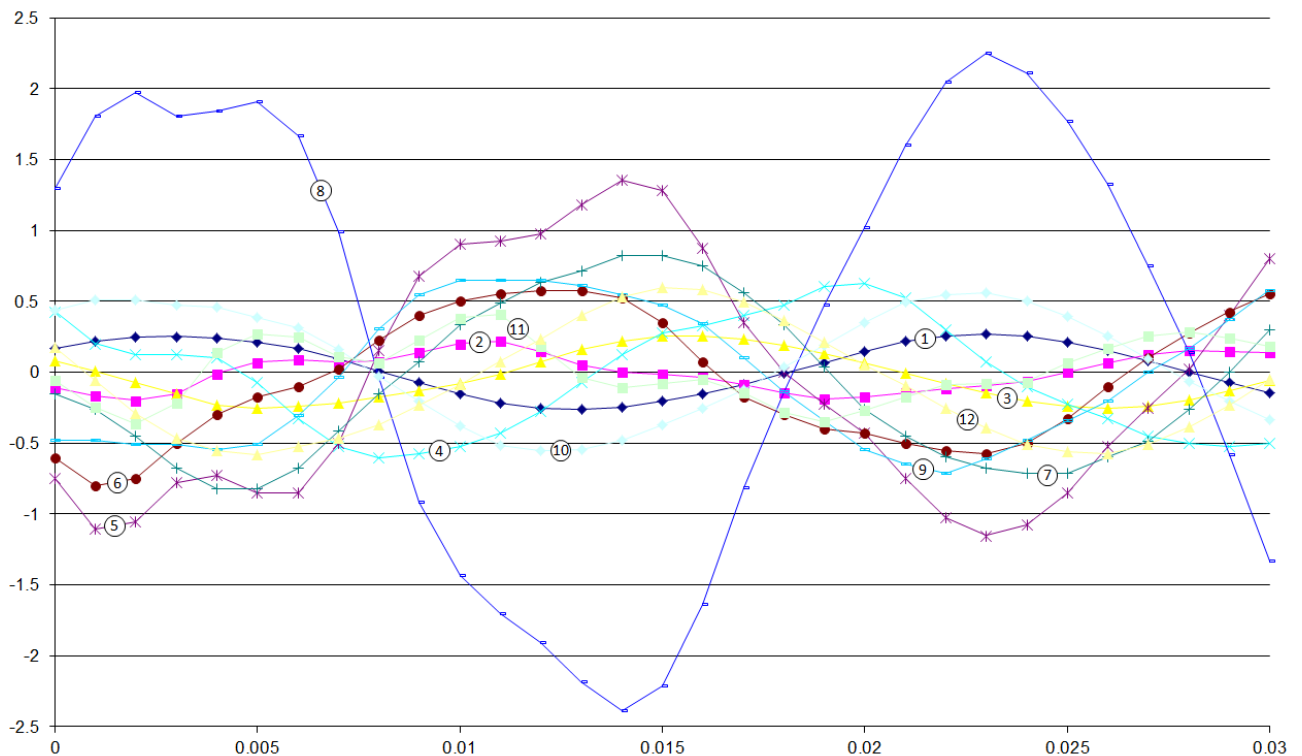


Рис. 3

Найчастіше за функцію мети обирають середньоквадратичне відхилення

$$Q(\vec{\lambda}) = \frac{1}{T} \int_0^T |\vec{y}(t) - \vec{\bar{y}}(t)|^2 dt, \quad (2)$$

де $\vec{\lambda}$ – вектор коефіцієнтів моделі, $\vec{y}(t)$ – експериментально виміряна реакція модельованого об'єкта; $\vec{\bar{y}}(t)$ – реакція об'єкта, розраховано за допомогою моделі.

У випадку дискретних моделей цей вираз буде мати наступний вигляд:

$$Q(\vec{\lambda}) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} |\vec{y}_k - \vec{\bar{y}}_k|^2, \quad k - \text{номер дискрети}. \quad (3)$$

Вектор $\vec{\lambda}$ у випадку дискретних рівнянь змінних стану (1) включає елементи матриць F, G, C, D і коефіцієнти розкладу нелінійної вектор-функції Φ .

Знайшовши точку, де згадана функція мети буде набувати мінімального значення, ми знайдемо оптимальний набір коефіцієнтів моделі для вибраної форми її представлення, які використовуватимуться для побудови моделі перехідних процесів та критерію оцінки її точності.

Даний підхід може застосовуватися для побудови макромоделей широкого класу об'єктів у практично будь-якій формі математичного представлення моделей за умови скінченності множини коефіцієнтів. Крім того, ідентифікація моделі може відбуватися на основі довільної інформації про модельований об'єкт за умови, що вона достатньо повно його описує. Це дає змогу використовувати фактично наявні дані про модельований об'єкт, і таким чином уникнути необхідності постановки

складних експериментів. Крім того, використання оптимізації дозволяє також уникнути поганої обумовленості задачі ідентифікації коефіцієнтів моделі, що є проблемою для багатьох інших алгоритмів.

Оскільки об'єкт моделювання в першому наближенні можна вважати лінійним, то побудова макромоделі робилася в 2 етапи.

На першому етапі будувалася лінійна модель у вигляді

$$\begin{cases} \bar{x}^{(k+1)} = F\bar{x}^{(k)} + G\bar{v}^{(k)} \\ \bar{y}^{(k+1)} = C\bar{x}^{(k+1)} + D\bar{v}^{(k+1)} \end{cases} \quad (4)$$

Для знаходження точки мінімуму функції мети використовувався алгоритм направляючого конуса Растрігіна з адаптацією довжини кроку пошуку та кута його розкриття [4], процедурою швидкого проходження пологих ділянок [1] та процедурою виходу з локальних мінімумів [2]. Похибка отриманої лінійної моделі на тестових перехідних процесах склала 8,4%.

На другому етапі проводилося уточнення макромоделі шляхом введення нелінійних коефіцієнтів. Даний об'єкт моделювання можна вважати таким, що характеризується непарністю характеристик (тобто зміна полярності вхідних величин призводить до аналогічної зміни полярності вихідних величин). Тому при використанні поліному для апроксимації нелінійних характеристик доцільно залишити лише кубічні члени. Для подальшого зниження кількості можливих коефіцієнтів макромоделі і спрощення її ідентифікації вважалося, що функція Φ залежить лише від елементів вектора змінних стану, тобто має наступний вигляд:

$$\Phi_i(\bar{x}^{(k)}, \bar{v}^{(k)}) = \sum_{j,k,l} \alpha_{ijkl} \bar{x}_j^{(k)} \bar{x}_k^{(k)} \bar{x}_l^{(k)}. \quad (5)$$

Ідентифікація нелінійних коефіцієнтів моделі проводилася з використанням того ж оптимізаційного алгоритму. Похибка отриманої моделі на тестовому сигналі склала 7,4%. Порівняння параметрів лінійної та нелінійної моделей наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Модель	Кількість коефіцієнтів	Середньоквадратична похибка	Макс. відносна похибка
Лінійна	81	8,4%	9,8%
Нелінійна	111	7,4%	9,0%

Той факт, що введення нелінійних коефіцієнтів не дозволило значно покращити точність отриманої моделі, свідчить, що вклад нелінійностей є незначним. Якщо об'єкт моделювання вважати лінійним, а дані про перехідні процеси, зареєстровані

системою Регіна, достатньо точними, а також припустити, що в процесі оптимізації було знайдено глобальний мінімум (тобто побудована лінійна модель є дійсно оптимальною моделлю 3-го порядку), відхилення мало б бути меншим за 8%.

Причини можуть бути дві:

1. Об'єкт моделювання має вищий порядок. Для отримання більш точної моделі в такому разі слід збільшити її розмірність, тобто кількість компонент вектора змінних стану.
2. Об'єкт моделювання змінився між зареєстрованими фактами аварій. Тому некоректно вимагати, щоб усі аварії описувалися однією моделлю.

На практиці спроба побудувати більш точну модель даного об'єкта шляхом підвищення розмірності моделі не призводить до суттєвого покращення її точності. Проте, якщо побудувати моделі окремо для перших двох аварій (22.07.2010 р. та 18.05.2011 р.) і для других двох аварій (пара аварій 05.12.2012 р.), то кожна з моделей вже в лінійному варіанті описує процеси з точністю дещо кращою за 4% (табл. 2). Надалі ці моделі будемо називати моделями №1 і №2 відповідно.

Таблиця 2

Модель	Середньоквадратична похибка для першої аварії з пари	Середньоквадратична похибка для другої аварії з пари	Середньоквадратична похибка для обох аварій
Модель для першої пари аварій (№1)	3,1%	3,6%	3,4%
Модель для другої пари аварій (№2)	2,5%	2,3%	2,4%

Таким чином, спроби побудови макромоделі підстанції "Альбертірша" за принципом "чорної скриньки" на підставі даних про аварії, записаних системою "Регіна", свідчать, що характеристики цієї підстанції дещо змінилися між 18.05.2011 р. та 05.12.2012 р.

Порівняння моделювання перехідного процесу, зображеного на рис. 3, з експериментальними даними показано на рис. 4, де цифрами позначено: 1- i_{a1} , 3- i_{b1} , 5- i_{c1} , 7- u_{a2} , 9- u_{b2} , 11- u_{c2} – експериментально зняті значення вихідних величин моделі, 2, 4, 6, 8, 10, 12 – відповідні їм величини, розраховані за допомогою моделі. Моделювання проводилося з використанням моделі №1, оскільки даний фрагмент належить першій аварії.

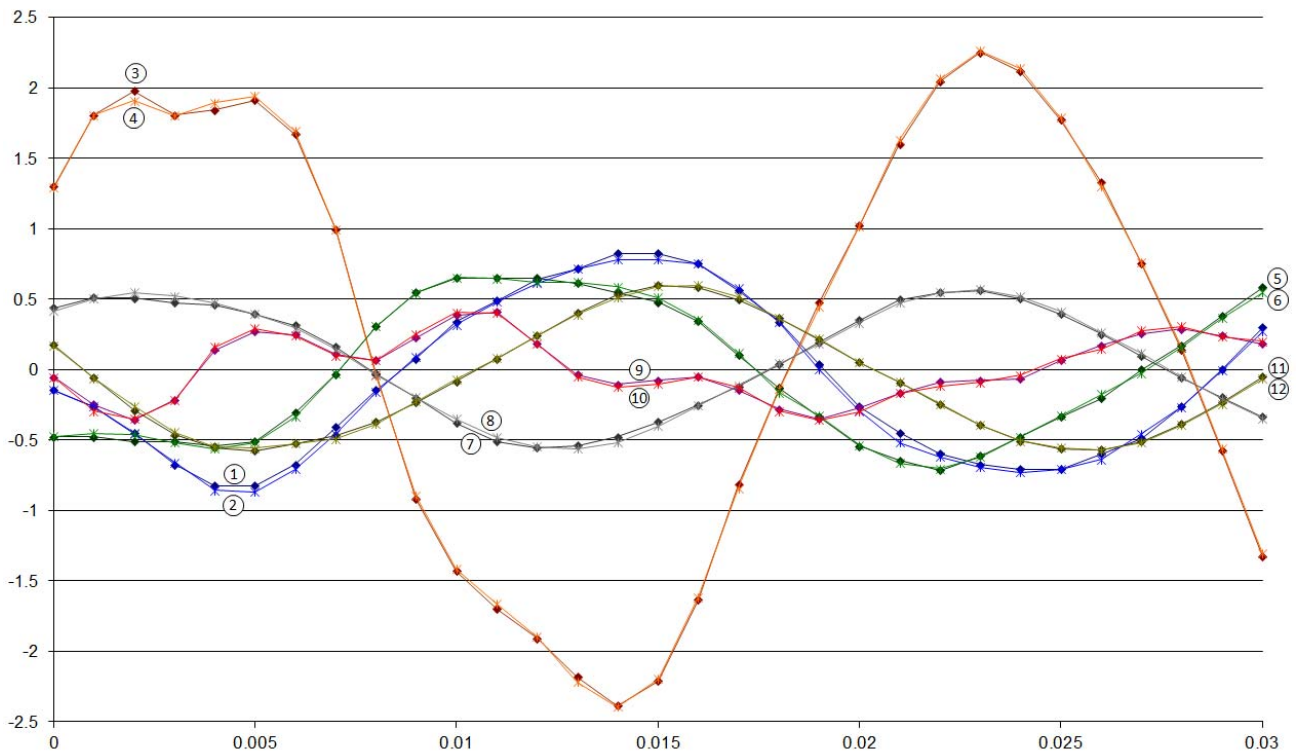


Рис. 4

Висновки. Завдяки використанню оригінального методу побудови дискретних динамічних моделей, який базується на концепції “чорної скриньки” і використовує оптимізаційний підхід, авторам вдалося побудувати досить точні макромоделі для перехідних процесів, що виникають на підстанції “Альбертірша”.

Апріорною інформацією для побудови зазначених макромоделей були дані щодо перехідних процесів, зумовлених аваріями і зафіксовані системою “Регіна”.

Були побудовані дві макромоделі на основі даних, зафіксованих у різні періоди часу (18.05.2011р. та 05.12.2012р.), які дещо відрізняються між собою, що можна пояснити можливими змінами у структурі підстанції протягом півторарічного періоду.

Верифікація побудованих макромоделей здійснювалася шляхом порівняння перехідних процесів, розрахованих шляхом моделювання і реальних перехідних процесів, зафіксованих в інших аварійних ситуаціях.

Запропонована макромодель підстанції, а також інших об’єктів ЕЕС, розроблених на підставі запропонованого методу макромодельовання, може використовуватися для тестування відповідних об’єктів ЕЕС під час їхньої експлуатації, а також дозволяє передбачати можливі аварійні ситуації та їхню ідентифікацію. Пропоновані макромоделі можуть бути корисними при схемотехнічному проектуванні як складові бібліотек математичного та програмного забезпечення автоматизованих систем наукових досліджень, що дозволить оцінити наслідки можливих аварійних ситуацій. Застосування макромоделей об’єктів ЕЕС, створених з використанням перехідних характеристик, отриманих за допомогою реєструючих комплексів, зокрема «Регіна», дозволить пришвидшити і покращити ефективність дослідження перехідних процесів та прогнозування аварійних режимів роботи об’єктів ЕЕС при їхньому застосуванні в енергетичних компаніях.

1. Букашкін С.А. Адаптивные алгоритмы синтеза нелинейных электронных схем. – К.: Знание, 1989. – 24 с.

2. Козак Ю.Я. Модифікація методу направляючого конуса Растрігіна // Електроніка і зв’язь. – Тематический випуск “Проблеми фізической і біомедіцинеской електроніки”. – 1997. – 424 с.

3. Стахів П.Г., Гоголюк О.П. Пришвидшений розрахунок перехідних процесів з використанням дискретних макромоделей компонент на прикладі електроенергетичних систем // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск "Проблеми сучасної електротехніки". – 2008. – Ч.6. – С. 17–21.

4. Стахів П.Г., Козак Ю.Я., Селепина Й.Р. Вдосконалення алгоритму оптимізації для ідентифікації параметрів макромоделей електромеханічних систем // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". "Електроенергетичні та електромеханічні системи". – Вип. 666. – 2010. – С. 98–102.

5. Стогній Б.С., Кириленко О.В., Буткевич О.Ф., Сопель М.Ф. Інформаційне забезпечення задач керування електроенергетичними системами // Енергетика: економіка, технології, екологія. – № 1. – 2012. – С. 13–22.

6. Якименко Ю.І., Прокопенко В.В., Денисюк С.П., Закладний О.М. SMART системи як одна із основних складових сталого розвитку енергетики // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2012. – № 1. – С. 4–13.

7. Arrillaga J., Watson N. Power systems electromagnetic transients simulation. – London: The Institute of Electrical Engineers. – 2003. – 421 p.

УДК 621.3.011.72

СОЗДАНИЕ ДИСКРЕТНЫХ МАКРОМОДЕЛЕЙ ОБЪЕКТОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ РЕАЛЬНЫХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Б.С.Стогний¹, академик НАН Украины, М.Ф.Сопель¹, канд.техн.наук, П.Г.Стахов², докт.техн.наук, Ю.Я.Козак², канд.техн.наук, Гоголюк О.П.², канд.техн.наук

¹– Институт электродинамики НАН Украины, пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина,

²– Национальный университет "Львовская политехника", ул. С.Бандеры, 12, Львов, 79013, Украина, e-mail: spg@polynet.lviv.ua

В статье рассмотрена проблема прогнозирования течения переходных процессов ЭЭС и их объектов на основе реальных временных характеристик, полученных во время их регистрации с помощью современных систем контроля параметров режимов и состояния оборудования энергетических объектов. Предлагается применение макромоделей элементов ЭЭС в виде "черного ящика" в форме переменных состояния, созданных на основе реальных данных, полученных в ходе натурных экспериментов или зарегистрированных нормальных и аварийных режимах для быстрого прогнозирования протекания переходных процессов. Описано создание макромоделей подстанции "Альбертирша" по принципу "черного ящика" на основе данных об авариях, зарегистрированных комплексом "Регина" и приведены полученные результаты. Библ. 7, табл. 2, рис. 4. Ключевые слова: электроэнергетическая система, макромоделей, программная среда, подстанция.

CREATION OF DISCRETE MACROMODELS OF ELECTRIC POWER SYSTEMS OBJECTS BASED ON ACTUAL EXPLOITATION CHARACTERISTICS

B.Stognii¹, M.Sopel¹, P.Stakhiv², Yu.Kozak², O.Hoholiuk²

¹– Institute of Electrodynamics of NAS of Ukraine, pr. Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine,

²– Lviv Polytechnic National University, S.Bandera str. 12, Lviv, 79013, Ukraine, e-mail: spg@polynet.lviv.ua

In the paper the problem of the transients forecasting for electric power systems and their objects based on real time characteristics obtained during their registration using modern monitoring systems of regime parameters and state of electric power systems. It is proposed to create macromodels of power system components in the form of state variables and "black box" approach using the data obtained during field experiments or registered normal and fault regimes for fast prognosis of the transient processes flowing. The development process of the substation Albertirsa macromodel based on "black box" approach and fault regimes data registered by Regina monitoring system is described and obtained results are presented. References 7, tables 2, figures 4.

Key words: electric power system, macromodel, program tools, substation.

1. Bukashkin S. Adaptive algorithms of nonlinear electronic circuits synthesis. – K.: Znanie, 1989. – 24 p. (Rus)

2. Kozak Yu. Modification of the Rastrigin's director cone method // Elektronika i sviaz. Tem. vypusk "Problemy fizicheskoi i biomeditsinskoi elektroniki". – 1997. – 424 p. (Ukr)

3. Stakhiv P., Hoholiuk O. Accelerated calculation of transient processes using discrete macromodels of component on example of electric power systems // Tekhnichna elektrodynamika. Tematychnyi vypusk "Problemy suchasnoi elektrotekhniki". – 2008. – Vol.6. – Pp. 17–21. (Ukr)

4. Stakhiv P., Kozak Yu., Selepyna Yo. Improvement of the optimization algorithm for identification of parameters of electromechanical system parameters // Visnyk Natsionalnoho Universytetu "Lvivska Politechnika". "Elektroenerhetychni ta elektromekhanichni systemy". – Vyp. 666. – 2010. – Pp. 98–102. (Ukr)

5. Stognii B., Kyrylenko O., Butkevych O., Sopel M. Infoware of electric power system control tasks // Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohii, ekolohiia. – 2012. – № 1. – Pp. 13–22. (Ukr)

6. Yakyumenko Yu., Prokopenko V., Denysiuk S., Zakladnyi O. SMART systems as one of main parts of stable development of electric power engineering // Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohii, ekolohiia. – 2012. – № 1. – Pp. 4–13. (Ukr)

7. Arrillaga J., Watson N. Power systems electromagnetic transients simulation. – The Institution of Electrical Engineers, London. – 2003. – 421 p.

Надійшла 22.10.2013